DANMARKS NATURVIDENSKABELIGE SAMFUND

A. Nr. 18

UDGIVET VED
UDVALGET FOR INGENIØRVIDENSKABELIG FORSKNING

ET PAR ANVENDELSER
AF ELEKTRISKE UDLADNINGER
I MAALETEKNIKEN:

SMAATIDSMAALING OG KLYDONOGRAF

AF

P. O. PEDERSEN

*Foredrag holdt ved
Den polytekniske Læreanstalts Aarsfest
den 6. Februar 1928*

SÆRTRYK AF »INGENIØREN« NR. 17, S. 201—209, 1928

KØBENHAVN
UDGIVET AF »DANMARKS NATURVIDENSKABELIGE SAMFUND«
I KOMMISSION HOS G. E. C. GAD, VIMMELSKAFTET 32, KØBENHAVN K.
1928

ET PAR ANVENDELSER AF ELEKTRISKE UDLADNINGER I MAALETEKNIKEN: SMAATIDSMAALING OG KLYDONOGRAF.

I Aaret 1777, 25 Aar efter, at *Benjamin Franklin* havde paavist Lynets elektriske Natur, iagttog den tyske Fysiker *Georg Christian Lichtenberg*[1]) nogle ejendommelige Forhold ved elektriske Udladninger langs Overfladen af faste Isolatorer. Forsøgene kan f. Eks. anstilles paa følgende Maade: Paa den jordforbundne Metalplade *B* (Fig. 1) lægges Ebonitpladen *P*, og

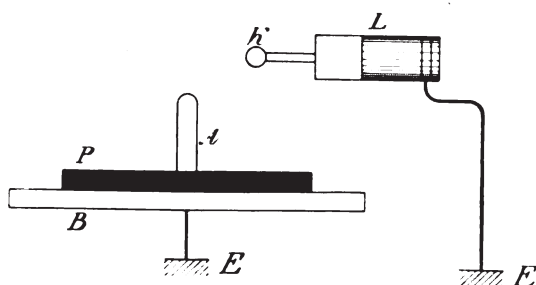


Fig. 1. Forsøgsopstilling til Frembringelse af *Lichtenberg*'ske Støvfigurer.

paa denne sættes Metalelektroden *A*. Knobben *K* af en ladet Leydnerflaske *L*, hvis ydre Belægning er sat til Jord, nærmes saa meget til *A*, at der slaar en Gnist over til denne. Fjærnes *A* derefter ved Hjælp af en isoleret Tang og bestrøes Pladen *P* med et passende Pulver (f. Eks. Heksemel, Svovlblomme m. m.), saa fremkommer der en karakteristisk Figur paa *P*'s Overdade. Udseendet af den dannede Figur afhænger i høj Grad af Fortegnet for den Elektricitetsmængde, der gennem Gnisten er tilført Elektroden *A*. Er denne positiv faas en stærk grenet Figur, som

---

[1]) *G. C. Lichtenberg*: (1) Nova methodo naturam ac motum fluidi electrici investigandi. Novi Commentarti Soc. Reg. Sc. Gottingensis. T. 8, p. 168–180. 1778. (2) Commentatio posterior. ib. Clas math. T. 1, p.65–79. 1779.

vist i Fig. 2; for negativ Elektricitet faas en skiveformig Figur, som den i Fig. 3 viste.

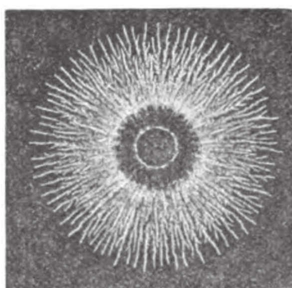


Fig. 2. Positiv *Lichtenberg* Støvfigur.



Fig. 3. Negativ *Lichtenberg* Støvfigur.

Det viste sig senere, at man kan faa endnu klarere og mere detailrige Figurer ved i Mørke at lade Udladningen foregaa langs Hindesiden af en fotografisk Plade, der derefter fremkaldes og fikseres paa sædvanlig Maade[1]). Fig. 4 viser en bekvem Opstilling til Optagelse af fotografiske

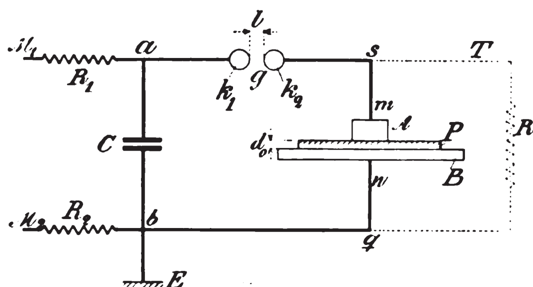


Fig. 4. Diagram for Opstilling til Optagelse af *Lichtenberg* Figurer.

Lichtenberg Figurer. Kondensatoren *C* oplades fra en til M_1 og M_2 forbunden Elektricermaskine. Er Spændingen bleven tilstrækkelig høj, slaar der en Gnist over i Gnistbanen *g*, og den elektriske Spænding forplanter sig langs Ledningen k_2sm til Metalelektroden *A*, der staar paa Hindesiden af den fotografiske Plade *P*. (Shunten *sTRq*, der indeholder den meget store Modstand *R*, en Skifergriffel eller lign., tjener til en langsom Aflad-

[1]) *J. Brown*: Phil. Mag. (5). Vol. 26, p. 502—505. 1888.
E. T. Trouvelot: La lumiére électrique. T. 30, p. 264—273. 1888.
A. A. Campbell Swinton: The Electrical Review. Vol. 31, p. 273—275. 1892.
K. Hansen: E. T. Z. Bd. 37, p. 610—611. 1916.
Særlig smukke fotografiske *Lichtenberg* Figurer findes i: *Lord Armstrong*: Electric Movement in Air and Water. 1st Ed. London 1897; 2nd Ed. 1899. (Et stort, pragtfuldt udstyret Værk).
S. Mikola: Phys. Zeitchr. Bd. 18, p. 158—168. 1917.

ning af Elektroden *A* og Hindesiden *P*. Finder en saadan Afladning ikke Sted, vil der let opstaa komplicerende Udladninger ved Berøring af *A* eller *P*). Eksempler paa saadanne fotografiske *Lichtenberg* Figurer er vist i Fig. 5—8. Alle fire Figurer er optagne ved Atmosfæretryk og gengivne i sand Størrelse med Undtagelse af Fig. 7, der er formindsket til 0.8 af s. S.

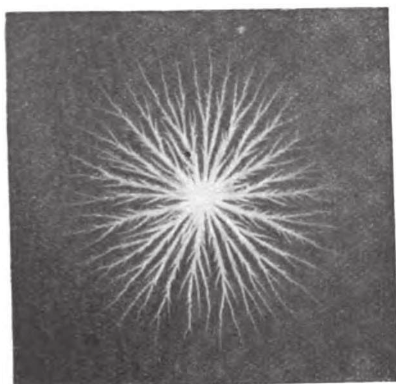


Fig. 5. Normal positiv Figur fra en spids Elektrode. (Gnistlængde $l = 5$ mm).

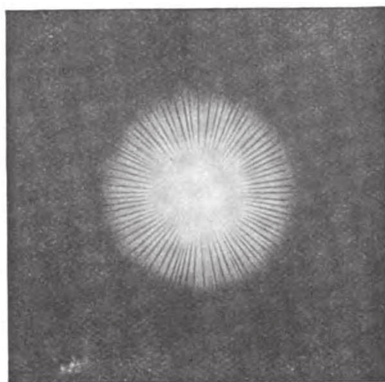


Fig. 6 Normal negativ Figur fra en spids Elektrode. ($l = 7$ mm).

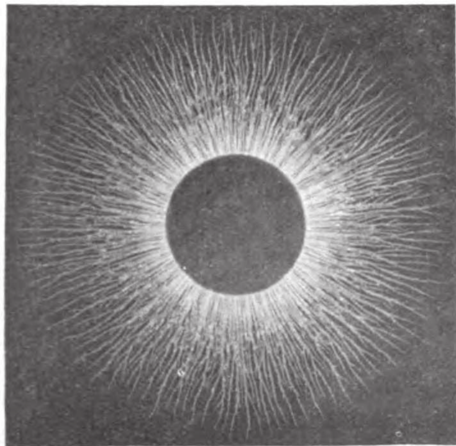


Fig. 7. Normal positiv Figur fra en cirkulær Elektrode. ($l = 7$ mm).

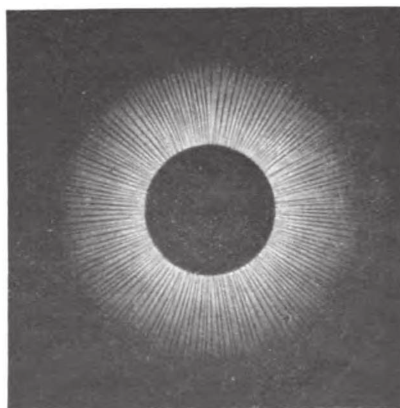


Fig. 8. Normal negativ Figur fra en cirkulær Elektrode. ($l = 7$ mm).

Forskellen mellem de positive og negative Figurer træder om muligt endnu stærkere frem ved den fotografiske Metode end ved den oprindelige Støvmetode.

Denne udprægede og meget ejendommelige Forskel i Udseendet af de positive og negative *Lichtenberg* Figurer vakte selvfølgelig straks stor In-

teresse blandt Fysikerne; den ligesom forjættede en Opklaring af de to »Elektricitetsarters« Natur. Der fremsattes en Række delvis meget ejendommelige Hypoteser; men Tiden var ikke moden til en frugtbar Drøftelse af de indviklede Forhold, hvorpaa disse Figurers Dannelse beror. Udbyttet af den til Tider ret livlige Drøftelse blev derfor ogsaa meget ringe, saa ringe, at Fysikerne efterhaanden ganske tabte Interessen for Spørgsmaalet, og det endda i den Grad, at hverken *A. Winkelmann*'s store »Handbuch der Physik« (1908) eller de to Hovedværker over Elektricitetens Ledning gennem Luft, nemlig *J. J. Thomson:* »Conduction of Electricity through Gases« (1906) og *J. S. Townsend:* »Electricity in Gases« (1915) overhovedet nævner Navnet *Lichtenberg*.

I Forsommeren 1917 eksperimenterede jeg med *Poulsen*-Buen under Anvendelse af Belysningsgas, men denne kom efterhaanden saaledes i »Surrogaternes« Tegn, at Forsøgene maatte opgives, og en halv Snes Dage før Sommerferiens Begyndelse stod jeg og var »arbejdsløs«. *S. Mikola*'s foran nævnte Artikel i »Phys. Zeitschrift« henledte min Opmærksomhed paa de *Lichtenberg*'ske Figurer, og jeg fik Lyst til at anvende de resterende 10 Dage af Semestret til at lege lidt med disse. »Legen« blev dog lidt mere langvarig end oprindelig paatænkt; den kom til at strække sig ikke over 10 Dage, men over 10 Aar — og maaske mere[1]).

Det første Spørgsmaal, der frembød sig til Afgørelse, var: Dannes Figurerne paa den Maade, at »Udløberne« starter inde ved Elektroden og bevæger sig udad — vokser ud — fra denne, eller foregaar Figurdannelsen paa den Maade, at Figuren straks opstaar i sin fulde Udstrækning, idet Intensiteten fra Nul efterhaanden vokser op til sin fulde Værdi. Denne sidste Dannelsesmaade kunde tænkes, hvis Figurerne skyldes en direkte Indvirkning af det fra Elektroden — eller Elektroderne — udgaaende elektriske Felt. Den første Dannelsesmaade var vel nok den sandsynligste, men de hidtidige Forsøg gav formentlig ikke noget helt afgørende Svar paa Spørgsmaalet.

Jeg prøvede at løse dette ved at anvende en delt *A*-Elektrode, som den i Fig. 11 viste, med fem parallelle Ben. Figurer optagne med en saadan er vist i Fig. 9 og 10, den første positiv, den sidste negativ.

Selv om disse Optagelser vel nok styrker Formodningen om, at Figurerne »vokser ud fra Elektroderne«, kan de dog næppe siges at give noget afgørende Bevis i saa Henseende. Derimod viser den regelmæssige

---

[1]) *P. O. Pedersen*: On the *Lichtenberg* Figures: Part I. Vid. Selsk. Mat.-fys. Medd. I, Nr. 11, København 1919; Part II. Medd. IV, Nr. 7. 1922. (I begge disse Afhandlinger findes ret udførlige Henvisninger til ældre og nyere Litteratur om Emnet). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der *Lichtenberg*schen Figuren und ihre Verwendung zur Messung sehr kurzer Zeiten. Ann. der Physik. (IV). Bd. 69, p. 205—230. 1922.

Opbygning og Adskillelse af Figurernes enkelte Dele, at for saa vidt Figurerne vokser ud fra Elektroderne, maa denne Vækst foregaa med en

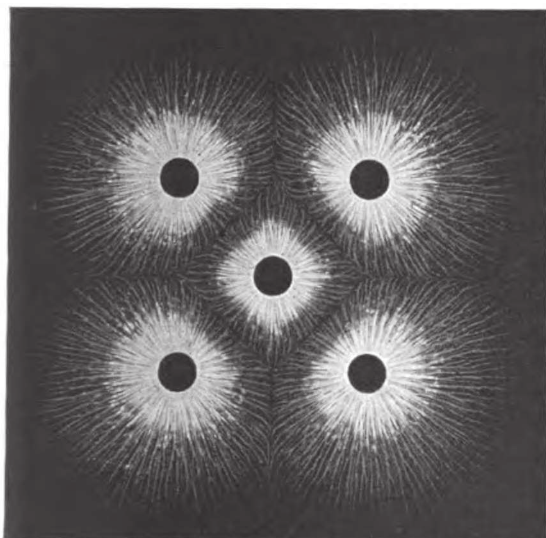


Fig. 9. Positiv Figur optaget med 5-delt Elektrode.

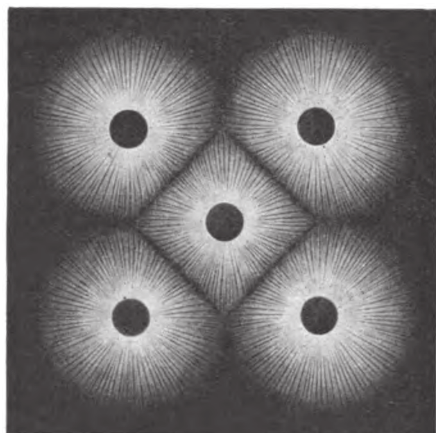


Fig. 10. Negativ Figur optaget med 5-delt Elektrode.

meget stor Regelmæssighed. Men naar dette er Tilfældet, maa det være muligt at bestemme den Hastighed, hvormed Væksten foregaar. Det viste sig da ogsaa at være forholdsvis let at løse denne Opgave. Metoden, der benyttes, er vist i Fig. 12. Højspændingskilden — f. Eks. en Elektricer-

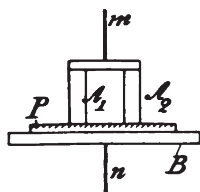


Fig. 11. Delt *A*-Elektrode med parallelle, foroven indbyrdes forbundne Elektroder A_1, A_2...

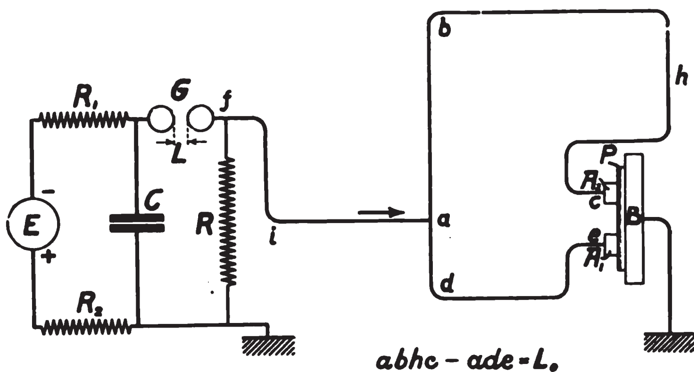


Fig. 12. Diagram til Bestemmelse af Figurernes Udbredelseshastighed.

maskine *E* — lader Kondensatoren *C* til en saa høj Spænding, at der slaar en Gnist over i Gnistgabet *G*; dermed starter der en elektrisk Vandrebølge ud ad Ledningen *Gfia*. Ankommen til det sidstnævnte Punkt, deler

Spændingsbølgen sig i to lige kraftige Bølger. Af disse gaar den ene langs *ade* til Elektroden A_1, der som sædvanlig er anbragt paa Hindesiden af den fotografiske Plade *P*, der atter hviler paa den jordforbundne Plade *B*. Naar Spændingsbølgen har naaet A_1, vil der begynde at »vokse« en Figur ud fra denne Elektrode. Imidlertid vil den anden Bølge bevæge sig ud ad Ledningen *abhc* til Elektroden A_2, som den naar noget senere end den først nævnte Bølge naar Elektroden A_1. Tidsforskellen τ bestemmes saaledes: De to Bølgers Vejforskel L_0 er bestemt ved $L_0 = abhc - ade$. Da Bølgerne praktisk talt bevæger sig med Lysets Hastighed ($= c = 3.10^{10}$ cm sek^{-1}) langs Ledningerne, er den til Vejforskellen L_0 svarende Tidsforskel bestemt ved

$$\tau = \frac{L_0}{c} = \frac{L_0}{3 \cdot 10^{10}} \text{ sek.}$$

Er den ydre Begrænsning af den fra A_1 udgaaende Figur i denne Tid naaet ud i en Afstand *a*, se Fig. 13, der er saa stor, at Figuren naar

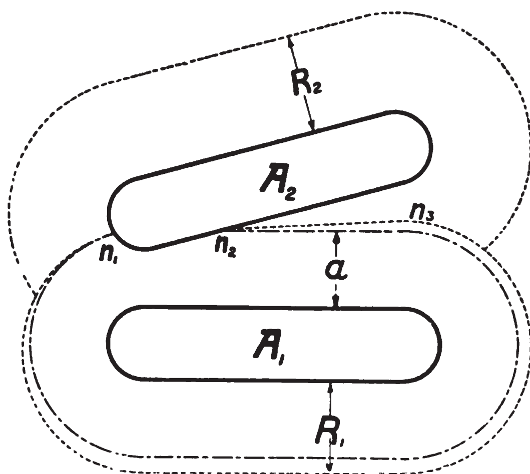


Fig. 13. Form og Stilling af Elektroderne A_1 og A_2 i Fig. 12.

over til Elektroden A_2, saa vil det Punkt n_2, hvor denne ydre Begrænsning skærer Elektroden A_2, øjensynlig kommer til at ligge stille, idet Spændingen paa A_2 nu — i hvert Fald meget nær — er lig med Spændingen paa A_1. Der vil nu ogsaa begynde at vokse en Figur ud fra A_2, og en nærmere Undersøgelse viser, at den indre Del, $n_2 n_3$, af Skillelinien mellem de to Figurer forløber retlinet. Man kan derfor ved Maaling paa den færdige Plade bestemme Punktet n_2 og derefter dette Punkts Afstand *a* fra A_1. Den gennemsnitlige Hastighed *u* er da bestemt ved

$$u = \frac{a}{\tau} = \frac{a}{L_0} \cdot 3 \cdot 10^{10} \text{ cm sek.}^{-1}.$$

Fig. 14 og 15 viser Eksempler paa saadanne Hastighedsbestemmelser.

Det vilde føre for langt at komme nærmere ind paa Resultatet af den Række Hastighedsmaalinger, der er foretaget. Det skal kun nævnes, at

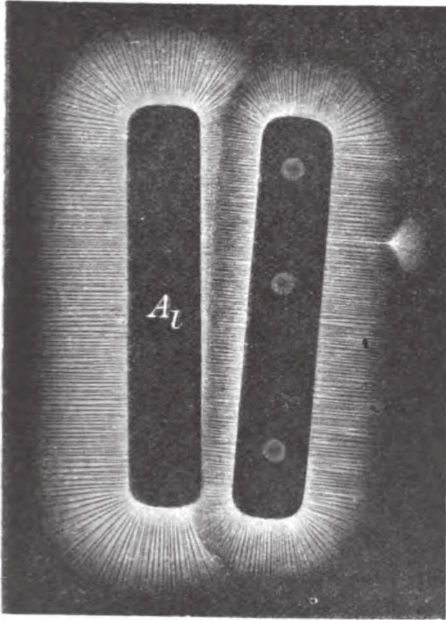


Fig. 14. Hastighedsbestemmelse ved Hjælp af negative Figurer ved Atmosfæretryk.

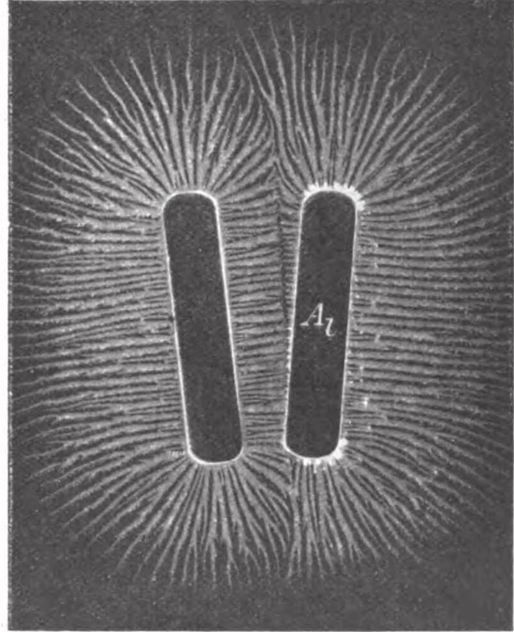


Fig. 15. Hastighedsbestemmelse ved Hjælp af positive Figurer. Lufttryk $p = 300$ mm Hg.

Hastigheden er større for positive end for negative Figurer under iøvrigt ens Forhold, samt at dens Værdi bl. a. afhænger af Gnistlængde, af Lufttryk og af Tykkelsen af den fotografiske Plade. Den positive Udbredelseshastighed kan i hvert Fald naa en Værdi af 10^8 cm sek^{-1} = 1000 km pr. sek. En saadan Udladning langs en fotografisk Hinde er en Slags Tidsviser, der bevæger sig med den nævnte, meget store Hastighed, og hvis øjeblikkelige Stilling man er i Stand til at fæstne med saa stor Nøjagtighed paa den fotografiske Plade, at Usikkerheden kun beløber sig til $^1/_{20}$ mm eller derunder. Der er saaledes øjensynlig en Mulighed for Maaling af meget korte Tidsrum.

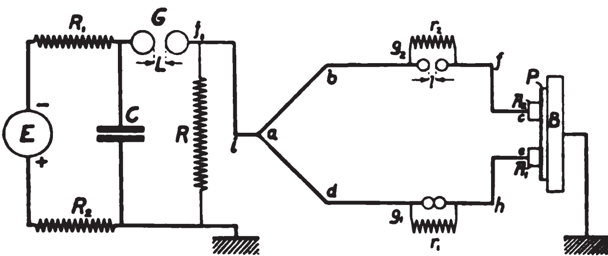


Fig. 16. Diagram for Opstilling til Maaling af Gnistforsinkelse.

Et Eksempel paa en Opstilling til Udførelse af en saadan Tidsmaaling er vist i Fig. 16. Virkemaaden forstaaes uden videre paa Grundlag af det

foregaaende. En Gnist i G udløser en Vandrebølge ud langs Ledningen fia. I sidste Punkt deler Bølgen sig i to lige kraftige Vandrebølger, der bevæger sig henholdsvis ud langs Ledningerne adg_1he og abg_2fc. De to Ledninger er nøjagtig lige lange, og hvis de to ens Forsøgsgnistbaner g_1 og g_2 begge er kortsluttede, saa vil de to Vandrebølger ankomme nøjagtig samtidig til Elektroderne A_1 og A_2. Skillelinien mellem de to Figurer, der udgaar fra de to Elektroder, vil da komme til at ligge nøjagtig midt mellem disse. Er derimod den ene Forsøgsgnistbane, f. Eks. g_2, aabnet til Gnistlængden l, saa vil det tage en vis Tid, førend Gnisten dannes i denne, og Vandrebølgen vil i saa Fald ankomme lidt senere til Elektroden A_2 end til A_1. Ved Hjælp af Skilleliniens Forskydning, kan man derefter bestemme Gnistforsinkelsen.

Ved Hjælp af denne Metode er det lykkedes Amerikanerne *P. Heymans* og *N. H. Frank*[1]) at maale Tidsforsinkelser ned til ca. 5.10^{-11} Sek. Det er den Tid, Lyset bruger til at gennemløbe en Strækning paa 1,5 cm. (Eller udtrykt paa anden Maade: Det er et Tidsrum, der er lige saa kort i Forhold til 1 Sekund, som 1 Sekund er i Forbold til 600 Aar).

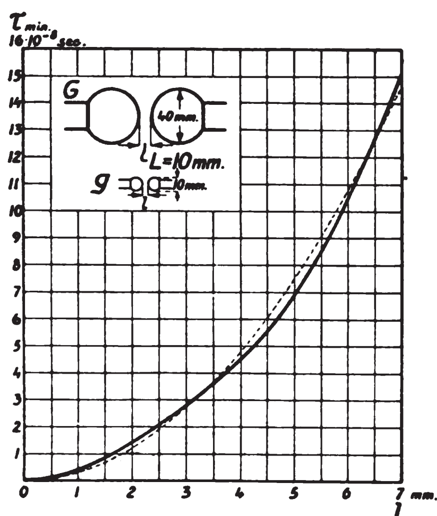


Fig. 17. Gnistforsinkelsens Afhængighed af Gnistlængden l for konstant Spænding, for atmosfærisk Luft ($p = 760$ mm Hg) og for rene Elektroder.

Man spørger uvilkaarlig: Har det nogen som helst Interesse at kunne maale saa korte Tider? Ja det har det. En Række fysiske — navnlig elektrofysiske — Fænomener forløber saa hurtigt, at en Undersøgelse af deres Tidsafhængighed kræver Maaling af saadanne, meget korte Tidsrum. Af disse skal jeg kun nævne den tidligere berørte Gnistforsinkelse. Vedrørende denne er der, for saa vidt angaar Gnistdannelse i Luft, i Laboratoriet for Telegrafi og Telefoni foretaget en stor Række Maalinger, der har ført til en Række ejendommelige Resultater, som i flere Henseenner kaster Lys over Gnistens Dannelsesmaade[2]). Jeg skal dog ikke komme ind paa disse Arbejder, der endnu ikke er helt afsluttede, men kun i Fig. 17 vise Resultatet af en enkelt Undersøgelsesrække, der angaar Gnistforsinkelsens

[1]) Phys. Rev. (II). Vol. 25, p. 865. 1925.

[2]) *P. O. Pedersen*: Om elektriske Gnister. I. Vid. Selsk. Mat. fys. Medd. IV, Nr. 10, 1922; II. s. S. VI, Nr. 4. 1924. (Ann. der Phys: (IV). Bd. 71, p. 317—376, 1923; Bd. 75, p. 827—847, 1924).
Teknisk Tidskrift (Stockholm), p. 174—184, 1923.

Afhængighed af Gnistlængden. Det viser sig, at saalænge den undersøgte Gnists Længde l er kort i Forhold til den Spænding, Forsøgsgnistbanen udsættes for, vil man med Tilnærmelse have, at

$$\text{Gnistforsinkelsen} = \text{Konst. } l^2.$$

I Løbet af det sidste Par Aar er der under Benyttelse af den angivne Metode i Japan udført en Række Undersøgelser vedrørende Gnistforsinkelse ikke alene i atmosfærisk Luft, men ogsaa i Olie og i faste Isolatorer, samt endelig ved Gnistdannelse i Skillefladen mellem faste, flydende og luftformige Isolatorer. Af disse Arbejder skal jeg dog kun nævne et enkelt, nemlig det af *M. Iwatake* udførte [1]).

Til Maaling af de ganske korte Forsinkelser benytter *Iwatake* den i Fig. 16 viste Metode; men da man ved denne vanskelig kan maale Tider, der er væsentlig større end ca. $2 \cdot 10^{-7}$ Sek., saa har han til Maaling af Tider paa omkring 10^{-4} Sek. benyttet en noget andet Fremgangsmaade, der er angivet i Fig. 18 og 19 og de tilhørende Figurtekster.

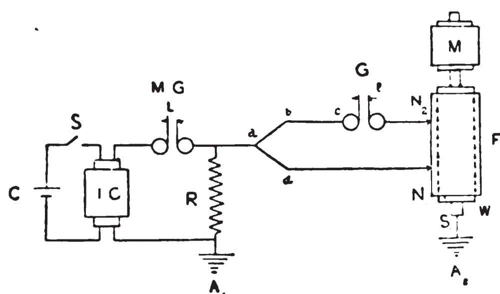


Fig. 18. *Iwatakes* Metode til Maaling af Gnistforsinkelse ved Hjælp af *Lichtenberg*ske Figurer. *F* er en Tromle, der holdes i hurtig Rotation af Motoren *M*. En fotografisk Film er lagt omkring *F*. De to Elektroder N_1 og N_2 er Spidser. Opstillingen er iøvrigt analog med den i Fig. 16 viste. De paa Filmen optagne Billeder ses i Fig. 19.

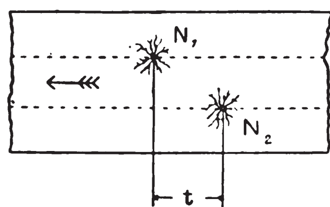


Fig. 19. Billede optaget med Opstillingen i Fig. 18. Af Filmens kendte Hastighed og af Afstanden t mellem de to Billeder, N_1 og N_2 kan man let beregne Forsinkelsen τ.

Af *Iwatakes* mange Forsøgsresultater skal jeg kun nævne et Par. Fig. 20 viser Gnistforsinkelsen i Luft for kugleformede Elektroder som Funktion af Længden af den undersøgte Gnistbane. For korte Gnistlængder finder ogsaa *Iwatake*, at Forsinkelsen er proportional med Gnistlængdens Kvadrat.

---

[1]) *M. Iwatake*: On the Time Lag of Spark and Surface Creepage. Technology Reports Tôhoku Imperial University. (Japan). Vol. VII, No. 1, p. 57—86. 1927. (Denne Afhandling indeholder en udførlig Litteraturfortegnelse, der bl. a. henviser til 17 andre japanske Afhandlinger, der beskæftiger sig med Spørgsmaalet. Af disse foreligger en Del dog kun paa Japansk, og er derfor mindre let tilgængelige).

Fig. 21 viser Gnistforsinkelser dels i Luft, dels i Olie baade for Kugleelektroder og for Naaleelektroder. Det fremgaar af Figuren: (1) at Forsinkel-

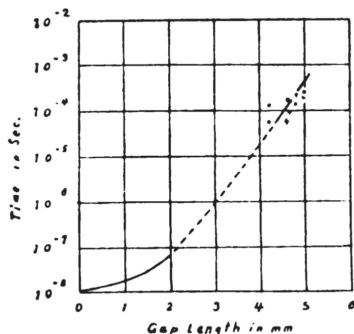


Fig. 20. Gnistforsinkelse i Luft med kugleformede Elektroder efter *Iwatake*.

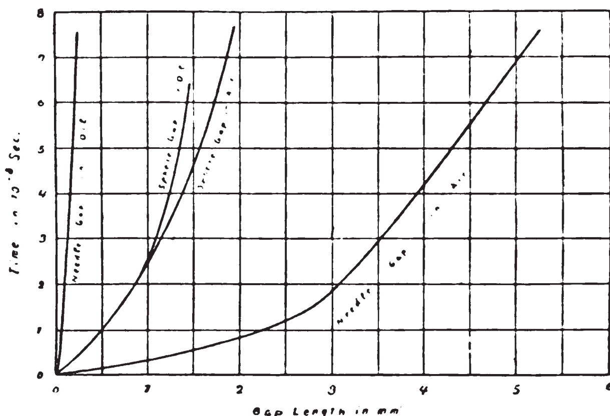


Fig. 21. Gnistforsinkelse i Luft og i Olie, dels for Kugle-, dels for Naaleelektroner.

sen for Kugleelektroder for korte Gnister omtrent er den samme i Luft og i Olie, (2) at Forsinkelsen i Luft er meget mindre for Naale- end for Kugleelektroder, og (3) at for Olie det omvendte er Tilfældet. Et ret interessant Resultat, som jeg dog ikke skal kommentere nærmere ved denne Lejlighed. Endelig viser Fig. 22 Forsinkelsen i Luft, Olie og i en Række faste Isolatorer. Det ses heraf, at Relationen $\tau =$ konstant $\cdot l^2$ ikke gælder for de faste Isolatorer Glimmer (M) og Glas (G). Det fremgaar af disse Kurvers Form, at man ved Anvendelse af ganske tynde Lag af disse Isolatorer med mellemliggende Metalfolier, maa kunne opnaa meget store Forsinkelser. Hermed hænger det sikkert ogsaa sammen, at Gennemslagsspændingen for en given Totaltykkelse uden Tvivl vil vokse stærkt ved en saadan Lagdeling[1]).

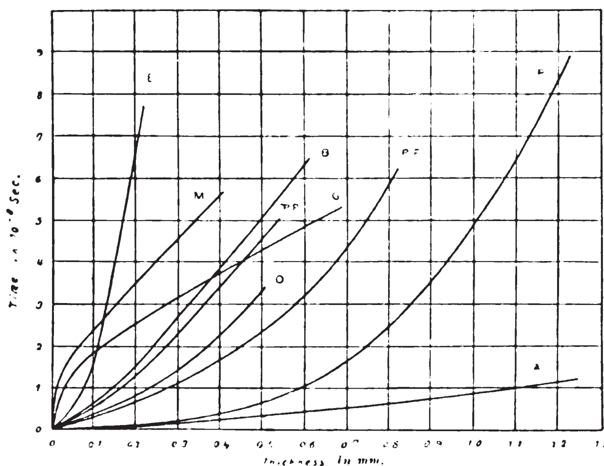


Fig. 22. Gnistforsinkelse i Luft, Olie og faste Dielektrica. A = Luft, O = Olie, P = Papir, PP = Prespap, PF = Paraffin, B = Bivoks, E = Ebonit, M = Glimmer og G = Glas.

[1]) Smlgn. *A. Joffé*: »Phys. Zeitschrift«. Bd. 28, p. 911—916. 1927.

Gnistdannelse under hurtig opvoksende Spænding vil foregaa ad den Bane, i hvilken Gnisten kan dannes i den kortest mulige Tid, og denne Bane vil ofte være en anden end den, i hvilken Gnistdannelsen kan foregaa under den mindst mulige Spænding. Det er i det hele taget klart, at Spørgsmaalet om Gnistforsinkelse er af ret stor Betydning for Elektroteknikken. Den angivne Metode tillader en meget bekvem Bestemmelse af denne Størrelse selv med ret primitive Hjælpemidler, og jeg tror, det vil lønne sig at dyrke dette Felt yderligere.

Den anden Anvendelse af de *Lichtenberg*'ske Udladninger, som jeg skal nævne, skyldes Ingeniør *J. F. Peters*[1]) (»Westinghouse Electric & Manufacturing Co.«), og tjener til Undersøgelse af Vandrebølger paa Højspændingsledninger. Det tilsvarende Apparat har han kaldt »Klydonograf«, der vel nærmest kan oversættes ved Bølgeskriver. Af pædagogiske Grunde vil jeg dog ikke begynde med Omtalen af den af *Peters* anvendte Fremgangsmaade, men derimod med den af *E. S. Lee* og *C. M. Foust* (»General Electric Co.«) angivne Metode[2]), for hvilken Princippet er vist i Fig. 23. Den ene *Lichtenberg*-Recorder er indskudt direkte mellem den undersøgte Ledning og Jord, idet den spændingsførende Ledning er forbunden til den lille Elektrode, i den anden er den lille Elektrode derimod i Forbindelse med Jord. En positiv Spænding i Ledningen giver følgelig et positivt Billede i den direkte Recorder, men et negativt i den anden. Omvendt for en negativ Liniespænding. Man opnaar herved bl. a., at man altid kan maale paa positive Figurer, hvis Udstrækning for samme Spænding

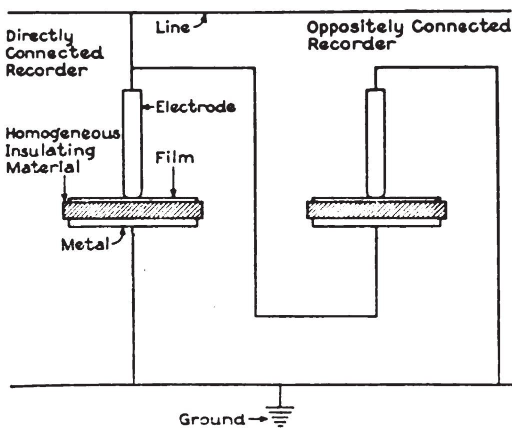


Fig. 23. Princip for Tilknytning af den direkte og den omvendte *Lichtenberg*-Recorder til den undersøgte Ledning (For lave Driftsspændinger). Efter *Lee* og *Foust*.

[1]) *J. F. Peters:* The Klydonograph. »El. World«. Vol. 83, p. 769—773. 1924.
J. H. Cox and *J. W. Legg:* The Klydonograph and its Application to Surge Investigations. »Trans. A. I. E. E.«, p. 857—870. 1925.
J. H. Cox: Transmission Line Voltage Surges. S. S. 1927. *J. H. Cox, P. H. Mc. Auley* and *L. Gale Huggins:* Klydonograph Surge Investigations. S. S. 1927.
J. H. Cox: Lightning and its Effects on Transmission Lines. S. S. 1927.
R. J. C. Wood: 220-Kv. Transmission Transients and Flashovers. S. S. p. 961—968. 1925.

[2]) *Everett S. Lee* and *C. M. Foust:* Measurement of Surge Voltages on Transmission Lines Due to Lightning. »Gen. Elec. Rev.« Vol. 30, p. 135—145. 1927. Se ogsaa »Trans. A. I. E. E.« 1927.

er betydelig større end de negatives. Fig. 24 viser et Eksempel paa Registrering af Overspændinger paa denne Maade. De mørke Baand svarer til selve Driftsspændingen (2840 Volt Maksimum, 60 Perioder), men Figuren viser tillige, at der har været 1 negativ og 2 positive Overspændinger paa henholdsvis 14 000, 13 000 og 17 000 Volt. Selve Registreringen sker paa fotografiske Film, der bevæger sig med en konstant Hastighed paa f. Eks. 1 cm pr. Time. Det er derfor selvfølgelig, at selve Liniespændingen, naar den har den fornødne Størrelse, vil give et Baand, der er sværtet over hele Længden. De kortvarige, stærke Overspændinger giver derimod enkelte, veldefinerede *Lichtenberg* Figurer.

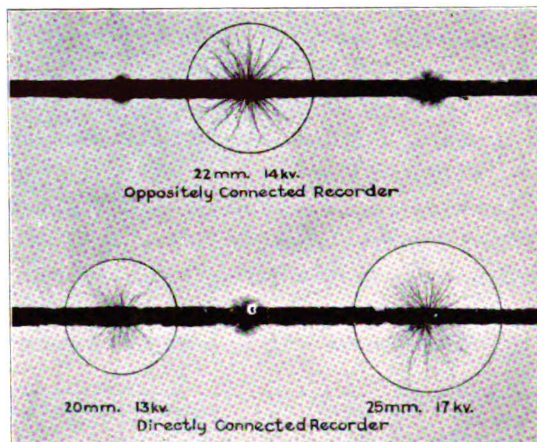


Fig. 24. Registrering af 1 negativ og 2 positive Overspændinger paa en Vekselstrømsledning med 60 Perioder og 2840 Volt Maksimum. Cirklerne uden om de positive Figurer angiver disses ydre Begrænsning og er bagefter indtegnede paa Filmen.

Er selve Driftsspændingen over nogle Kilovolt, saa kan man ikke forbinde Klydonografen direkte til Ledningen, saaledes som vist i Fig. 23, men maa paa en eller anden Maade foretage en Spændingsdeling, saaledes at Klydonografen kun udsættes for en Brøkdel af de i Ledningen optrædende Spændinger. I modsat Fald vil Figurerne blive saa store og uregelmæssige, at de er uanvendelige til det foreliggende Øjemed. Da Klydonografens Strømforbrug er yderst ringe — det drejer sig kun om den elektrostatiske Opladning af det af Figurerne dækkede Areal — volder denne Spændingsdeling ingen Vanskelighed; den kan f. Eks. foregaa paa den i Fig. 25 viste Maade. Fig. 26 viser et Eksempel paa Registreringen af Overspændinger paa en 220 kv-Ledning under Anvendelse af Spændingsdeling.

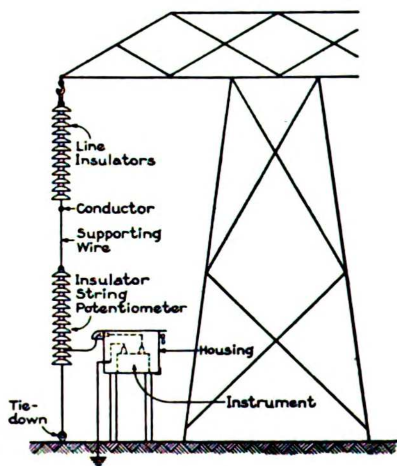


Fig. 25. Spændingsdeling ved Hjælp af en Kæde af Isolatorer. Se ogsaa Fig. 34.

Den af *J. F. Peters* anvendte Metode til Spændingsdeling fremgaar af Fig. 27. Den spændingsførende Ledning forbindes til en isoleret, stor

Ring eller lignende. I det omtrent homogene Felt mellem denne og Jordens Overflade anbringes en lille, isoleret Plade eller »Antenne«, der er i ledende Forbindelse med Klydonografens Spændingsklemme. Fig. 28—30 viser Eksempler paa den praktiske Udførelse af denne Spændingsdeling.

I. F. Peters bestemmer imidlertid ikke alene Vandrebølgernes Spænding og Fortegn, men ogsaa Bølgefrontens Stejlhed og Bølgernes Vandringsretning. Til Bestemmelse af Bølgefrontens Stejlhed anvendes den i Fig. 31 viste

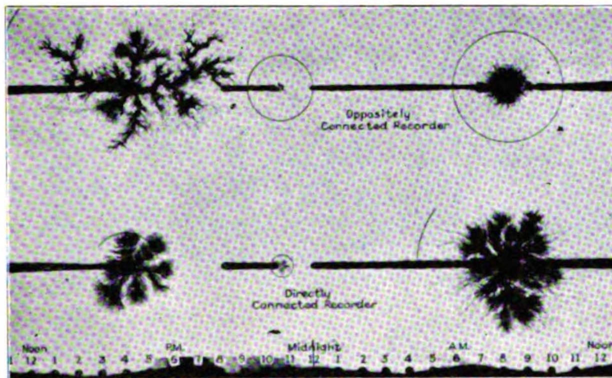


Fig. 26. Eksempel paa Overspændinger frembragt af Lynet i en 220 kV-Ledning. Spændingerne er formindskede 60 Gange. Figurerne til venstre svarer til en Overspænding paa ca. 2000 kV negativ. De mellemste Figurer svarer til ca. 780 kV negativ. Figurerne til højre svarer omtrent til 2100 kV. positiv. (Forbindelsen mellem Apparatet og Ledningen har været afbrudt mellem 4 og 8 om Eftermiddagen og mellem 11 og 12 Nat).

Opstilling. Fra den undersøge Linie *B* induceres der Spændinger over i den viste Ledning og disse Spændinger er proportionale med $\frac{di}{dt}$, hvor *i* er Strømmen i Ledningen. Den højeste inducerede Spænding er saaledes proportional med Vandrebølgens største Stejlhed. Klydonografen er shuntet med en Impedans *Z*, over hvilken langsomt varierende Strømme udligner sig uden at paavirke Klydonografen. De pludselig inducerede Spændinger registreres derimod af Klydonografen. Fig. 32 viser et Klydonogram for de 3 Faseledninger *x*, *y*, *z* af et 120 000 Volt Anlæg. Den med »Antenne« betegnede Figurrække viser de Figurer, der svarer til de Spændinger, der induceres i den i Fig. 31

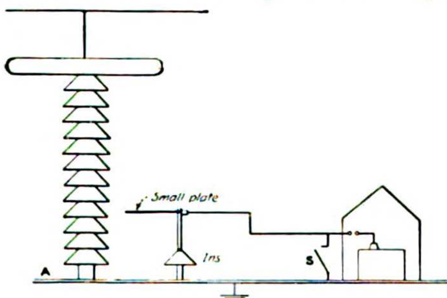


Fig. 27. Spændingsdeling ved Hjælp af en »Antenne«. Gnistbanen, der er indskudt mellem Antennen og Klydonografen skal hindre Driftsspændingen og ganske smaa Overspændinger i at gøre sig gældende. Kortslutteren *S* tjener kun til at sætte Apparatet ud af Funktion.

viste Paralleltraad. Disse Figurers Størrelse angiver saaledes et Maal for Bølgefrontens største Stejlhed.

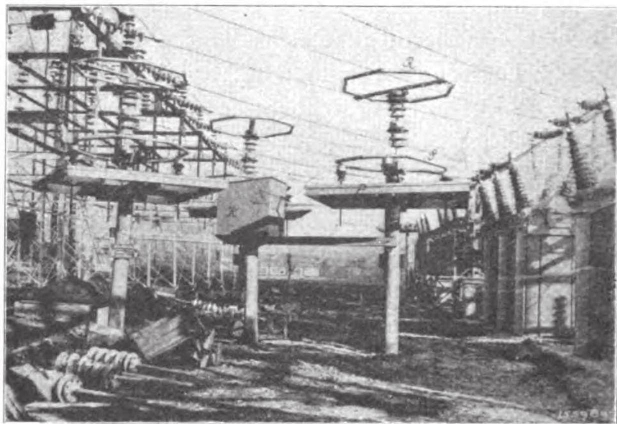


Fig. 28. Spændingsdeling og Opstilling af Klydonograf for 66 000 Volt Ledning.
Den undersøgte Ledning er forbunden til Ringen *R*. Maalespændingen tages mellem den isolerede Ring *S* og den jordforbundne Plade *P*. I Træhuset *K* er den til *R S P* hørende Klydonograf installeret.

Der findes formentlig omkring 400 Klydonografanlæg i U. S. A., og der er indvundet en Række værdifulde Erfaringer med Hensyn til Overspændingernes Hyppighed, Størrelse og Fortegn, Frontens Stejlhed m. m. Med Hensyn til det nærmere herom maa dog henvises til de foran nævnte Afhandlinger.

Klydonografen har ogsaa, om end i mindre Grad, fundet Anvendelse i Tyskland. Fig. 33 viser en af *H. Müller*[1]) konstrueret transportabel Spændingsdeler[2]).

De sidste Par Aar har bragt enkelte andre Metoder til Undersøgelse af Vandrebølgers Forhold, af hvilke Elektronstraaleoscillografen fortjener at nævnes. Denne er bl. a. udviklet og anvendt af Svenskeren *H. Norin*-

---

[1]) *H. Müller:* Der Klydonograph, ein Mittel zur Feststellung von Ueberspannungen. »Mitteil. d. Hermsdorf Schomborg Isolatoren G. M. B. H.« Heft. 27, p. 813—829. 1926.
Die experimentelle Bestimmung der Stern der Wanderwellen. »Zeitschr. f. tech. Phys.«, p. 49—55, 95—101. 1927.

[2]) Naar *H. Müller* benytter Betegnelsen den *Pedersen*ske Klydonograf er dette næppe berettiget, idet denne kunde have været konstrueret uden Benyttelse af Resultaterne af mine Undersøgelser, selv om disse vel nok har haft den Betydning, at de henlede Opmærksomheden paa hele dette Felt. Det vilde formentlig være rigtigere at kalde Apparatet enten den *Lichtenberg*ske eller den *Peters*ske Klydonograf.

der[1]) ved »Vattenfalsstyrelsens« store og betydningsfulde Undersøgelser paa dette Omraade. Der er vel næppe Tvivl om, at man paa denne Maade kan opnaa fuldstændigere og sikrere Resultater end ved Hjælp af de *Lich-*

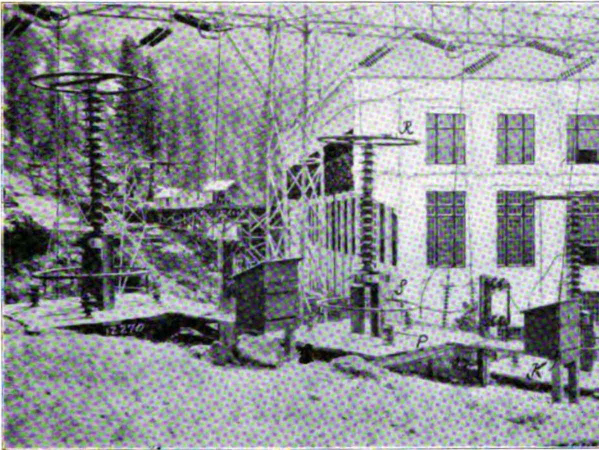


Fig. 29. Klydonograf for 220 000 Volt Ledning. *R*, *S*, *T* og *K* har samme Betydning som i Fig. 28.

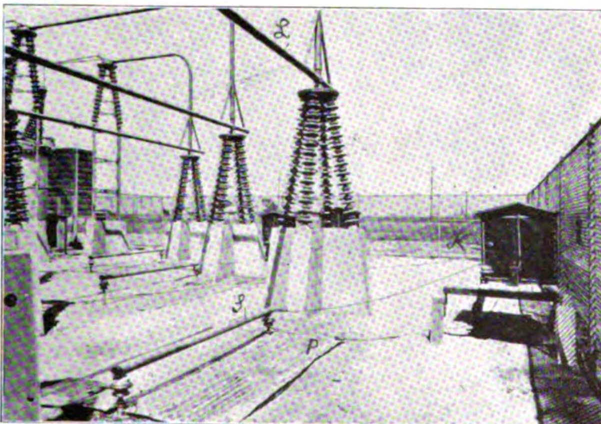


Fig. 30. Klydonograf for 220 000 Volt Ledning. Maalespændingen tages her mellem den isolerede Metalstang *S* og Jordpladen *P*. *L* er en spændingsførende Ledning. Klydonografen findes i det lille Træhus *K*.

[1]) *H. Norinder:* A Cathode Ray Oscillograph for Electric Line Transients. »Tekn. Medd. fr. Kungl. Vattenfalsstyrelsen«. Ser. E. Nr. 14. Uppsala 1927.

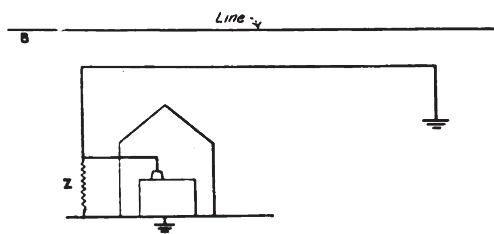


Fig. 31. Opstilling til Maaling af Bølgefrontens Stejlhed.

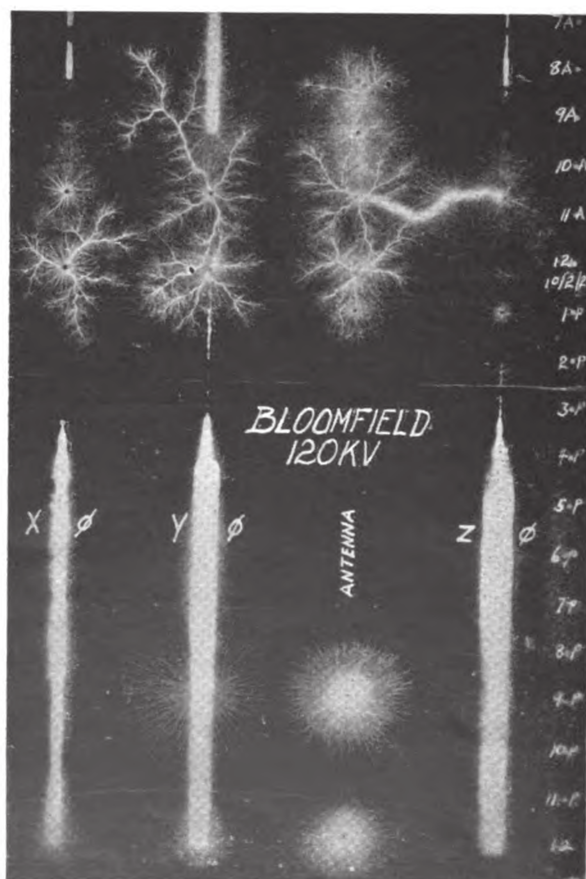


Fig. 32. Klydonogram for 120 000 Volt 3-faseledning med Stejlhedsmaaling. Der findes stærke Vandrebølger fremkaldt af Lyn mellem 8 Fmd. og 1 Eftmd., samt Kl. 9 og Kl. 12 Nat.

tenbergske Figurer[1]); men Metoden er ogsaa meget mere kompliceret. I enkelte Tilfælde tror jeg ogsaa, at den med Elektronstraaleoscillografen opnaaelige Nøjagtighed i nogen Grad overvurderes[2]). De *Lichtenbergske* Figurers Muligheder med Hensyn til Bestemmelse af Bølgefrontens Stejlhed har heller ikke endnu været fuldt udnyttede; man vil f. Eks. være i Stand til at bestemme Spændingsfaldet paa en Længde af 25 cm.

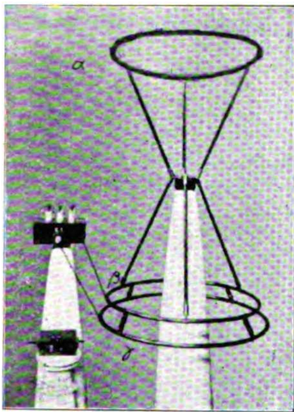


Fig. 33. Transportabel Spændingsdeler med Klydonograf efter *H. Müller*. Ringen α forbindes til den spændingsførende Ledning og Ringen γ til Jord. Klydonografen indskydes mellem β og γ.

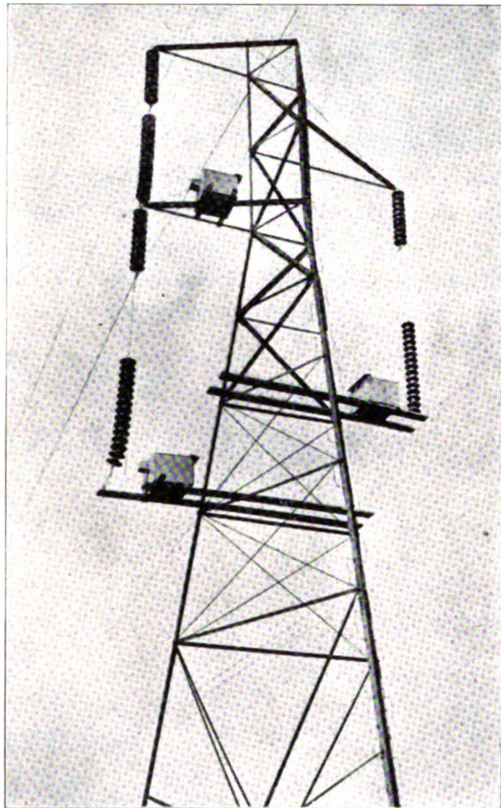


Fig. 34. En af »General Electric Company« anvendt Metode til Opstilling af Klydonografer.

Til Slut vil jeg gerne understrege, at jeg ikke har valgt de her fremdragne Anvendelser til Emne for mit Foredrag, fordi jeg tillægger disse Anvendelser en meget stor Betydning. De er kun meget beskedne Eksempler blandt mange andre paa hurtig teknisk Anvendelse af fysiske Iagttagel-

[1]) Opmærksomheden maa ogsaa henledes paa de af det tyske »Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen« udførte Undersøgelser. »Forschungshefte«, Nr. 1. Berlin 1927.

[2]) *W. Rogowski, E. Flegler* u. *R. Tamm:* »Archiv f. Elektrotech.« Bd. 18. p. 479. 1927.

ser. Jeg har kun valgt dem, fordi jeg føler mig nogenlunde hjemme paa dette Omraade og saa fordi de giver en ganske god Illustration paa den Grundighed og Omhyggelighed, hvormed den videnskabelig arbejdende Elektroteknik — i særlig Grad i Amerika, Japan og Tyskland — følger med i Literaturen ikke alene paa det elektrotekniske Omraade, men ogsaa paa det fysiske Grænseomraade.

Lynet og de *Lichtenbergske* Udladninger er nogle af de først iagttagne og først studerede, elektriske Fænomener. Forklaringen af deres Dannelsesmaade har imidlertid frembudt meget store Vanskeligheder. For *Lichtenberg*figurernes Vedkommende maa disse Vanskeligheder formentlig nu siges at være løste. Derimod frembyder Lynet endnu en Række Gaader. Den stærke elektrotekniske Interesse for dette Spørgsmaal i Forbindelse med det Kendskab til de elektriske Udladninger, som *Lichtenberg*undersøgelserne har bragt, vil dog formentlig medvirke til Løsningen af enkelte af disse Gaader.